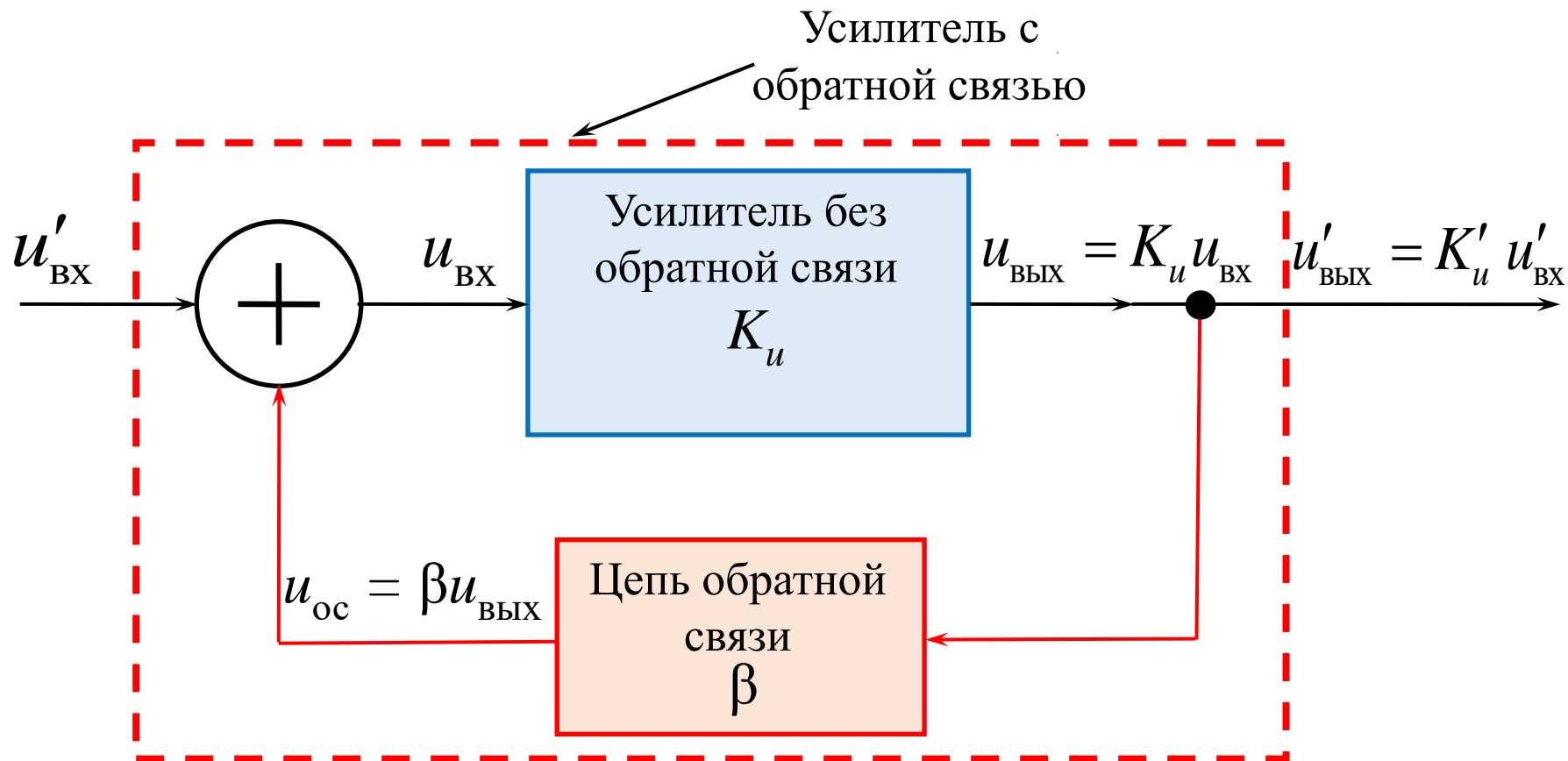


# ОБРАТНЫЕ СВЯЗИ В УСИЛИТЕЛЯХ



$$u_{\text{ВХ}} = u'_{\text{ВХ}} + u_{\text{ос}} = u'_{\text{ВХ}} + \beta u_{\text{ВЫХ}} \quad u'_{\text{ВЫХ}} = u_{\text{ВЫХ}} = K_u u_{\text{ВХ}} = K_u (u'_{\text{ВХ}} + \beta u_{\text{ВЫХ}})$$

$$K'_u = u'_{\text{ВЫХ}} / u'_{\text{ВХ}} = u_{\text{ВЫХ}} / u'_{\text{ВХ}} = K_u + \beta K_u K'_u$$

$$K'_u = \frac{K_u}{1 - \beta K_u}$$

# Отрицательная обратная связь

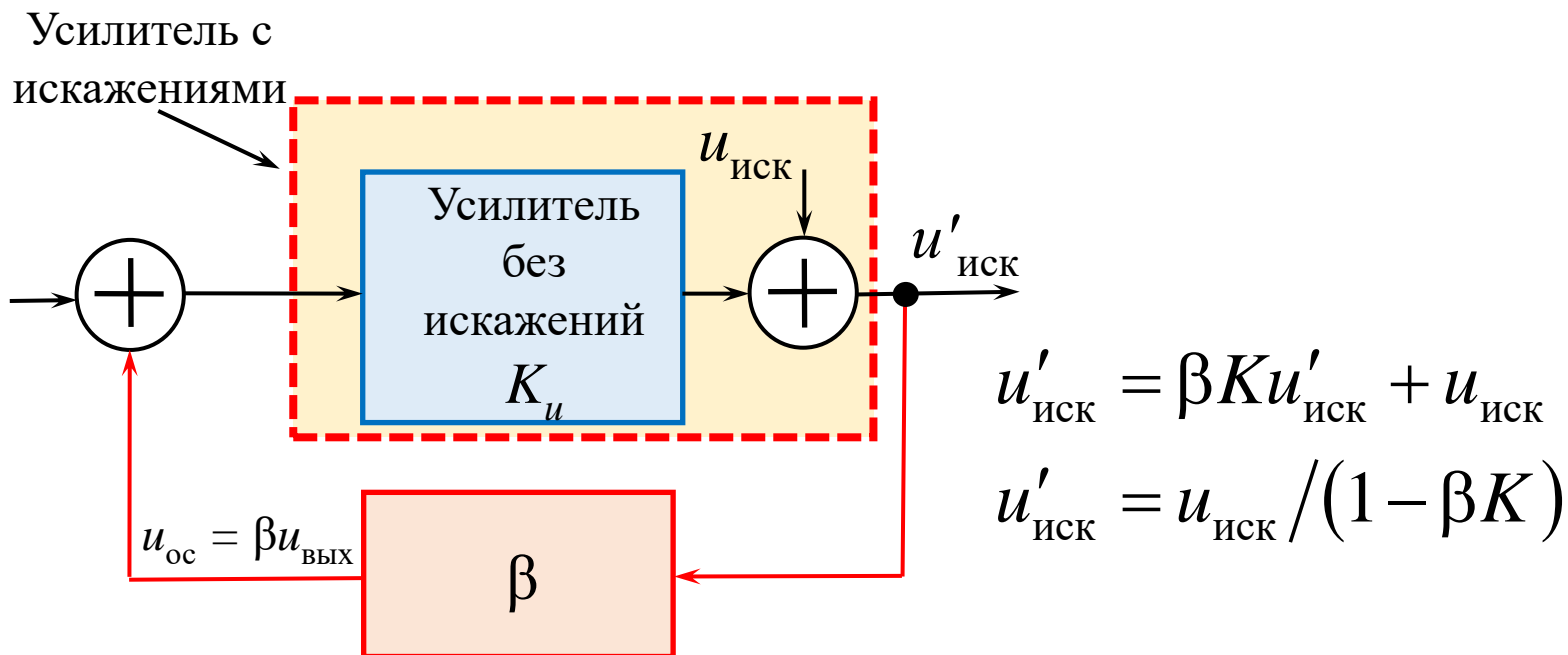
$$K'_u = \frac{K_u}{1 - \beta K_u} \quad \beta K_u - \text{петлевое усиление}$$

Если  $K'_u < K_u$  то обратную связь (ОС) называют отрицательной.

При отрицательной ОС  $\beta K_u < 0$ .

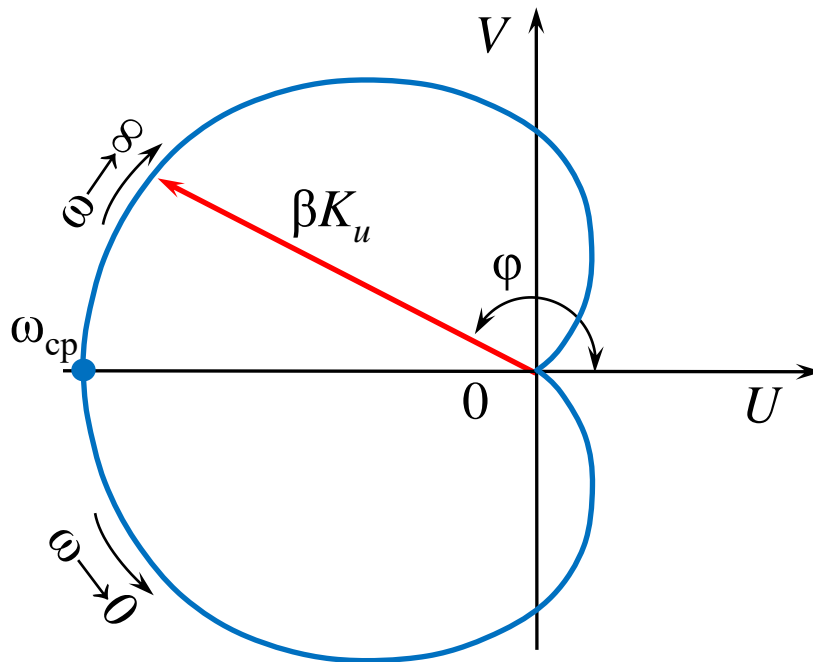
Сильная обратная связь:  $|\beta K_u| \gg 1$       $K'_u \approx 1/\beta$

## Уменьшение искажений при отрицательной ОС



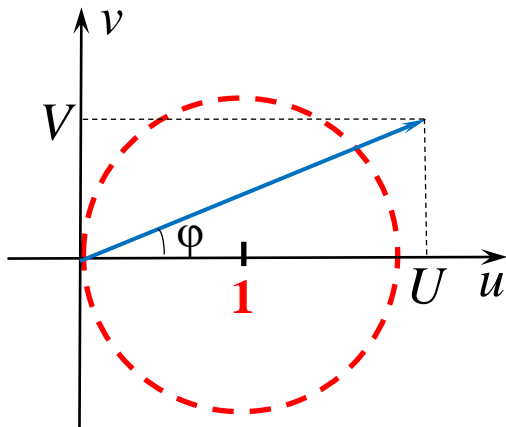
# Диаграмма Найквиста

$$K_u(j\omega) \cdot \beta(j\omega) = U + jV, \quad U = |K_u \beta| \cos \varphi \quad V = |K_u \beta| \sin \varphi$$



# Устойчивость усилителя с обратной связью

$$\frac{K'_u(j\omega)}{K_u(j\omega)} = \frac{K_u(j\omega)}{(1 - \beta(j\omega)K_u(j\omega)) \cdot K_u(j\omega)} = \frac{1}{1 - U - jV},$$



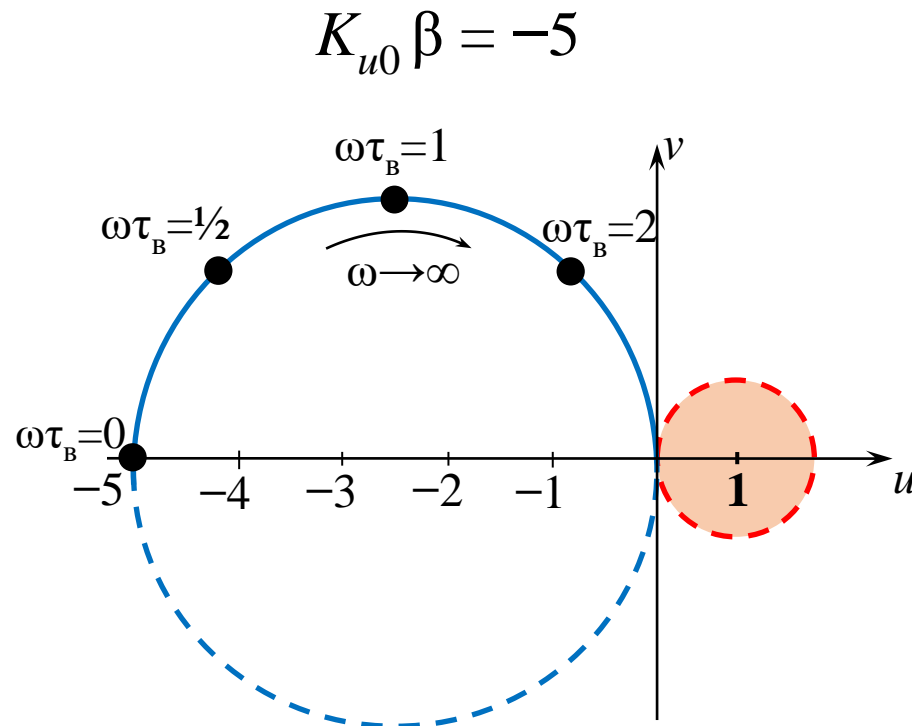
$$\left| K'_u(j\omega) / K_u(j\omega) \right|^2 = \frac{1}{(1 - U)^2 + V^2}.$$

## Критерий устойчивости Найквиста

Усилитель с обратной связью устойчив, если годограф петлевого усиления не охватывает точку с координатами (1, 0).

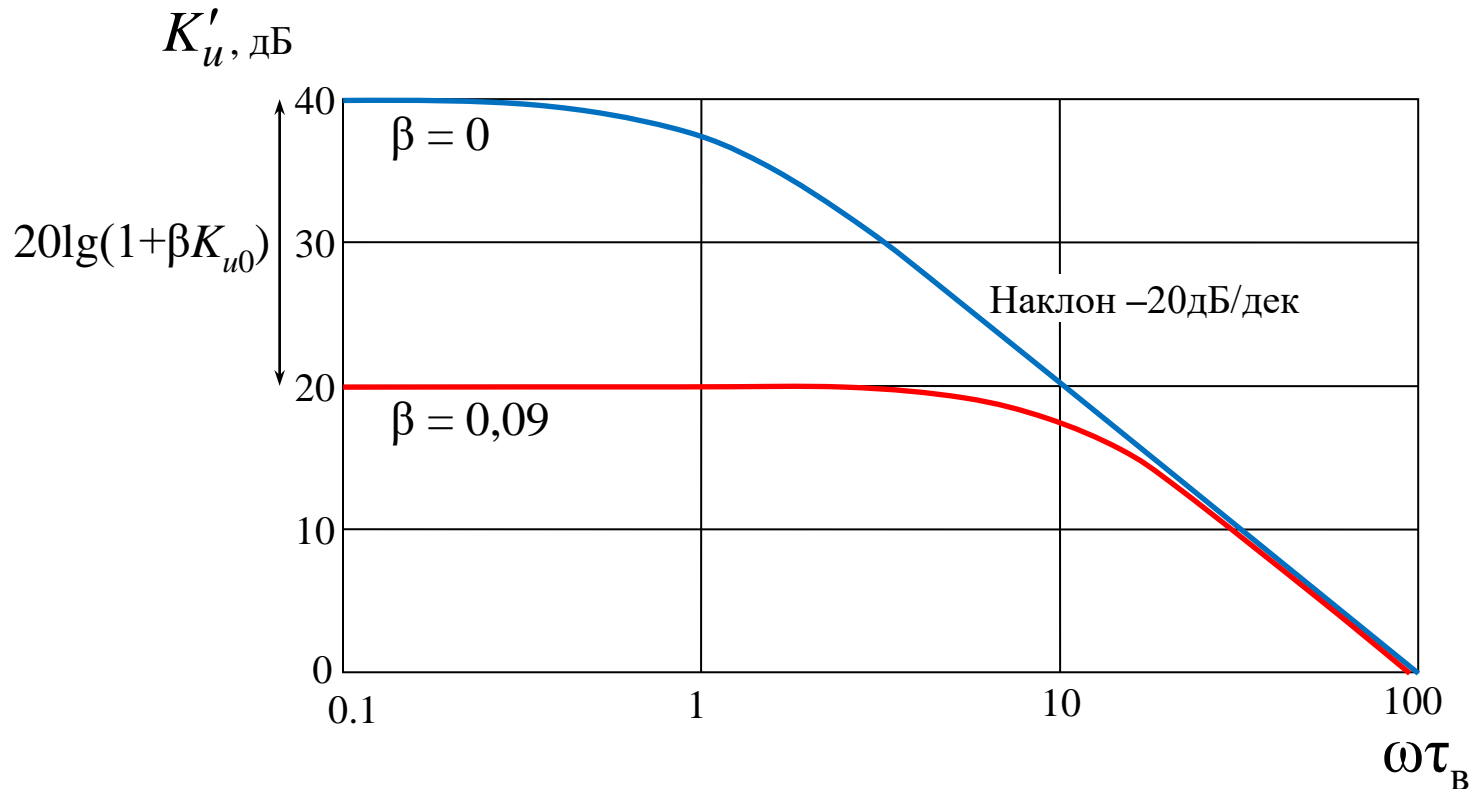
# Устойчивость 1-каскадного усилителя

$$K_u(j\omega) = \frac{K_{u0}}{1 + j\omega\tau_B}, \quad K_u(j\omega) \cdot \beta(j\omega) = -K_{u0}\beta / (1 + j\omega\tau_B)$$

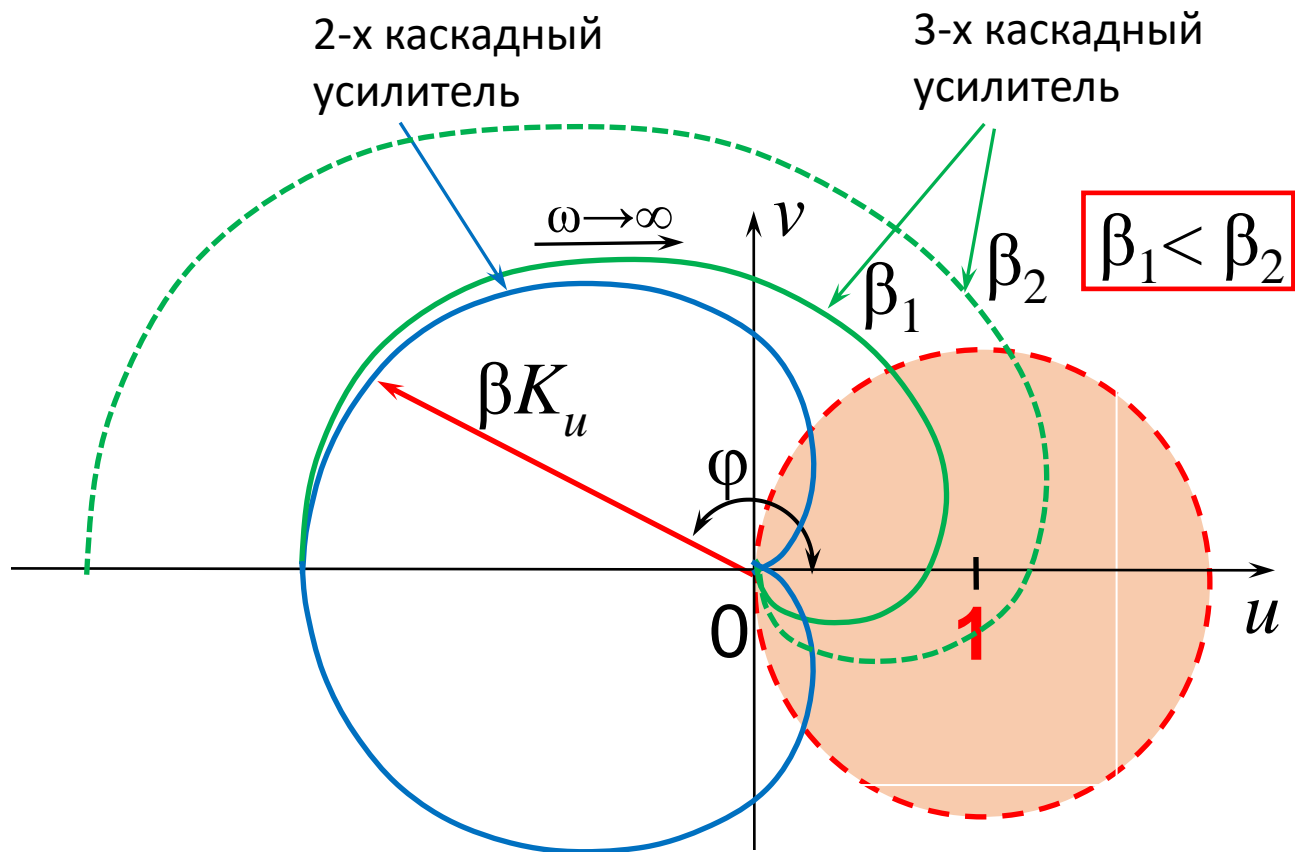


# Частотная характеристика 1-каскадного усилителя

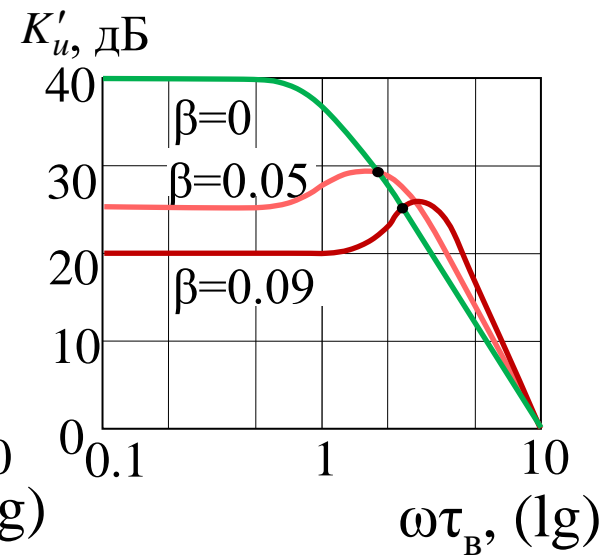
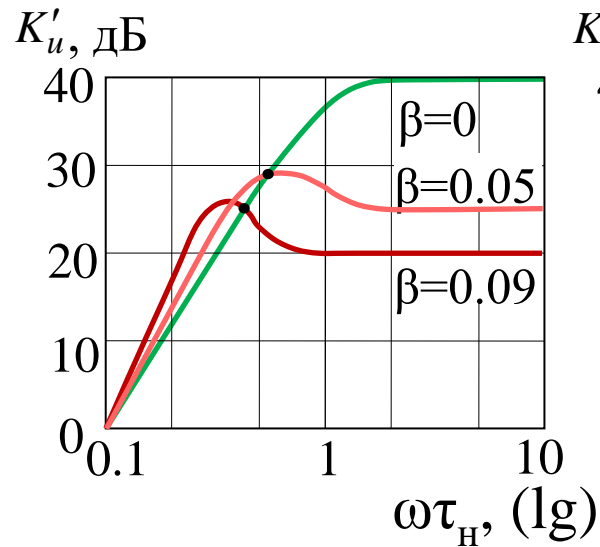
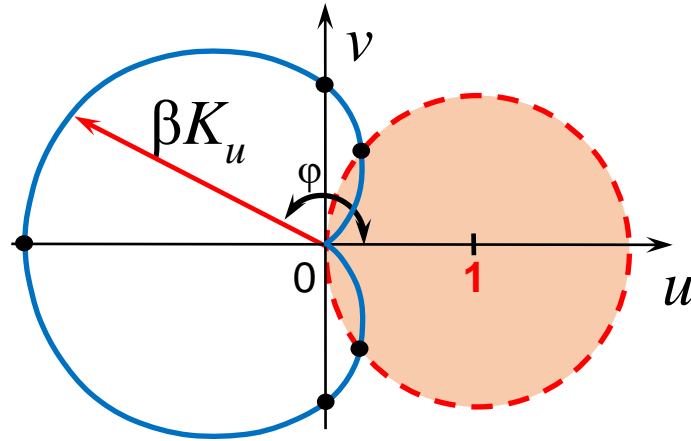
$$K'_u(j\omega) = \frac{K_u(j\omega)}{1 - \beta K_u(j\omega)} = \frac{K'_{u0}}{1 + j\omega\tau'_B}, \quad K'_{u0} = \frac{K_{u0}}{1 + \beta K_{u0}} \quad \tau'_B = \frac{\tau_B}{1 + \beta K_{u0}}$$



# Устойчивость многокаскадных усилителей



# Частотная характеристика 2-каскадного усилителя





# Виды обратных связей

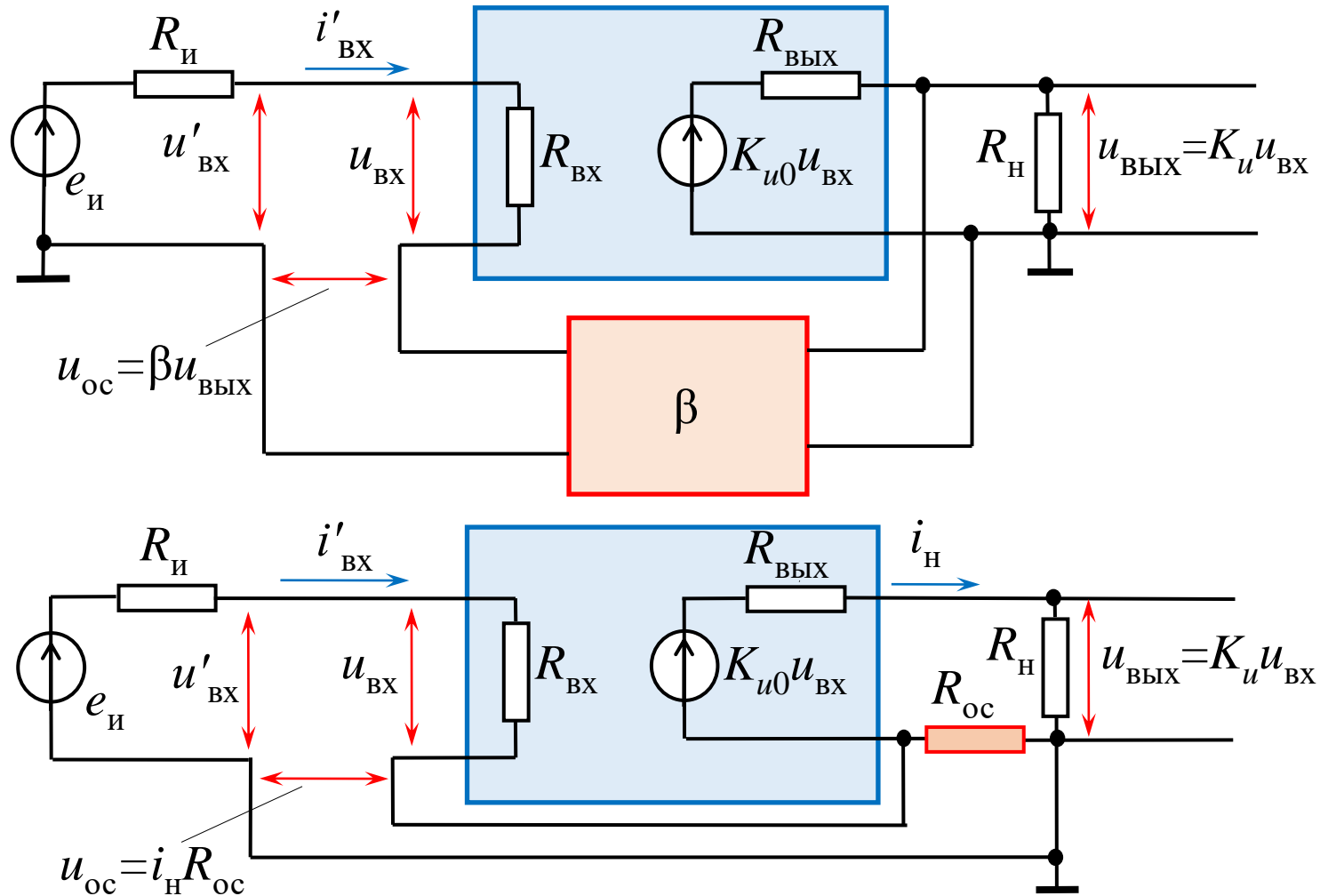
## 1. Последовательная обратная связь

- По напряжению
- По току

## 2. Параллельная обратная связь

- По напряжению
- По току

# Последовательная обратная связь



# Последовательная обратная связь

## *Входное сопротивление*

$$R'_{\text{BX}} = u'_{\text{BX}} / i'_{\text{BX}} \quad u_{\text{BX}} = u'_{\text{BX}} + u_{\text{OC}} = u'_{\text{BX}} + \beta u_{\text{ВЫХ}} \quad R'_{\text{BX}} = R_{\text{BX}} (1 - \beta K_u)$$

При  $\beta K_u < 0$

$$R'_{\text{BX}} = R_{\text{BX}} (1 + |\beta K_u|)$$

Для обратной связи по току  $\beta = u_{\text{OC}} / u_{\text{ВЫХ}} = R_{\text{OC}} / R_{\text{H}}$  при  $i'_{\text{BX}} \square i_{\text{H}}$

## *Выходное сопротивление*

При  $u'_{\text{BX}} = 0$  создадим на выходе  $u_{\text{ВЫХ}}$

$$u_{\text{ВЫХ}} = K_{u0} u_{\text{BX}} - R_{\text{ВЫХ}} i_{\text{ВЫХ}}$$

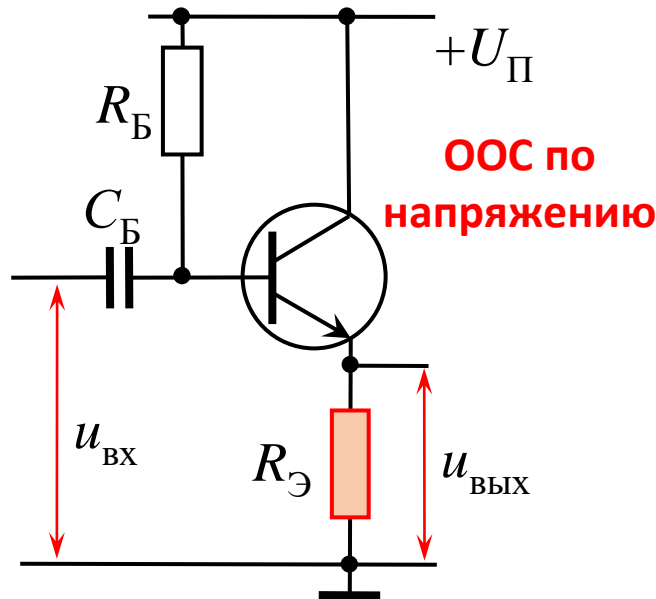
$$i_{\text{ВЫХ}} = \frac{u_{\text{ВЫХ}} - K_{u0} u_{\text{BX}}}{R_{\text{ВЫХ}}} = \frac{u_{\text{ВЫХ}} - K_{u0} \beta u_{\text{ВЫХ}}}{R_{\text{ВЫХ}}}$$

$$R'_{\text{ВЫХ}} = \frac{u_{\text{ВЫХ}}}{i_{\text{ВЫХ}}} = \frac{R_{\text{ВЫХ}}}{1 - \beta K_{u0}}$$

При отрицательной ОС ( $\beta K_u < 0$ )

$$R'_{\text{ВЫХ}} = \frac{R_{\text{ВЫХ}}}{1 + |\beta K_{u0}|}$$

# Примеры усилителей с отрицательной последовательной обратной связью



$$\beta = -1 \quad K_u = SR_{\text{Э}} \ll 1$$

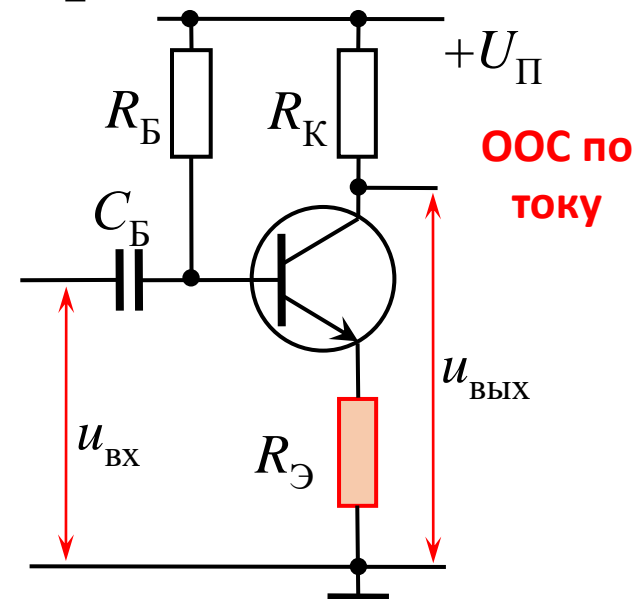
$$K'_u = SR_{\text{Э}} / (1 + SR_{\text{Э}}) < 1$$

$$R'_{\text{ВХ}} = R_{\text{ВХ}} (1 + |\beta K_u|) = h_{11\text{Э}} (1 + SR_{\text{Э}}) =$$

$$= h_{11\text{Э}} + (1 + h_{21\text{Э}}) R_{\text{Э}}$$

$$R'_{\text{ВЫХ}} = r_{\text{кЭ}} / (1 + Sr_{\text{кЭ}}) =$$

$$= 1 / (S + 1/r_{\text{кЭ}}) \approx 1/S$$



$$\beta = R_{\text{Э}} / R_{\text{К}} \quad K_u = -SR_{\text{К}}$$

$$K'_u = -SR_{\text{К}} / (1 + SR_{\text{К}} \cdot (R_{\text{Э}} / R_{\text{К}})) =$$

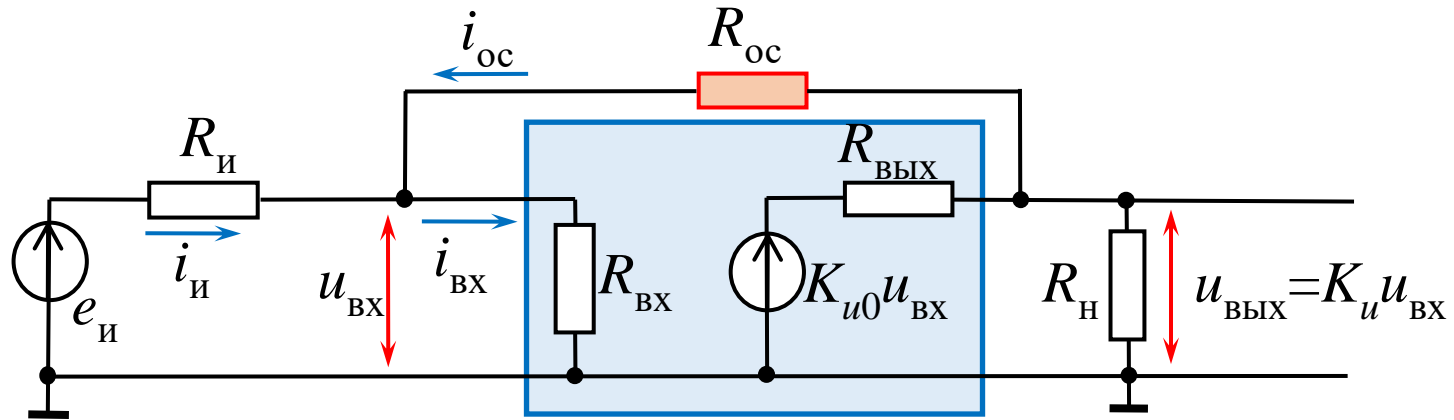
$$= -SR_{\text{К}} / (1 + SR_{\text{Э}}) \approx -R_{\text{К}} / R_{\text{Э}}$$

$$R'_{\text{ВХ}} = h_{11\text{Э}} + (1 + h_{21\text{Э}}) R_{\text{Э}}$$

$$R'_{\text{ВЫХ}} = R_{\text{ВЫХ}} + R_{\text{оС}} (1 + |K_{u0}|) =$$

$$= r_{\text{кЭ}} + R_{\text{Э}} (1 + Sr_{\text{кЭ}})$$

# Параллельная обратная связь по напряжению



$$K'_u = K_u = K_{u0} \left( R_Н / (R_Н + R_{ВЫХ}) \right)$$

$$u_{ВХ} = \frac{R_{ВХ} \parallel R_{ОС}}{R_И + (R_{ВХ} \parallel R_{ОС})} e_И + \frac{R_{ВХ} \parallel R_И}{R_{ОС} + (R_{ВХ} \parallel R_И)} u_{ВЫХ}$$

$$\beta = \frac{R_{ВХ} \parallel R_И}{R_{ОС} + (R_{ВХ} \parallel R_И)}$$

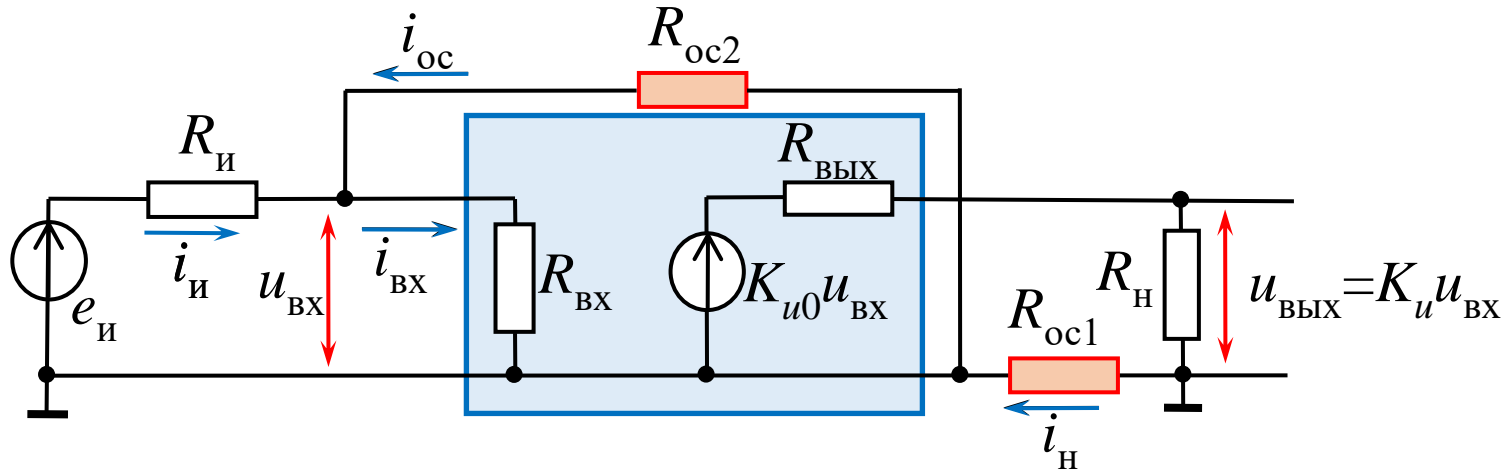
$$\gamma = \frac{R_{ВХ} \parallel R_{ОС}}{R_И + (R_{ВХ} \parallel R_{ОС})}$$

$$K'_e = \frac{u_{ВЫХ}}{e_И} = \frac{\gamma K_u}{1 - \beta K_u}$$

$$R'_{ВХ} = R_{ВХ} \parallel \frac{R_{ОС}}{1 - K_u}$$

$$R'_{ВЫХ} = \frac{R_{ВЫХ}}{1 - \beta K_{u0}}$$

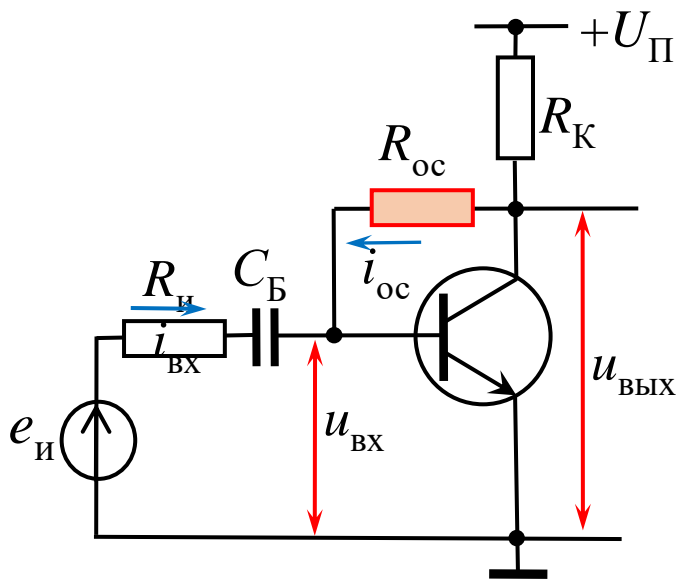
# Параллельная обратная связь по току



$$\gamma = \frac{R_{\text{ВХ}} \parallel R_{\text{oc2}}}{R_{\text{И}} + (R_{\text{ВХ}} \parallel R_{\text{oc2}})}, \quad \beta = \beta_1 \cdot \beta_2, \quad \beta_1 = \frac{R_{\text{oc1}}}{R_{\text{Н}}}, \quad \beta_2 = \frac{R_{\text{ВХ}} \parallel R_{\text{И}}}{R_{\text{oc2}} + (R_{\text{ВХ}} \parallel R_{\text{И}})},$$

$$K'_e = \frac{\gamma K_u}{1 - \beta K_u} \quad R'_{\text{ВХ}} = R_{\text{ВХ}} \parallel \frac{R_{\text{oc2}}}{1 - \beta_1 K_u} \quad R'_{\text{ВЫХ}} = R_{\text{ВЫХ}} + R_{\text{oc1}} (1 - \beta K_{u0})$$

# Пример усилителя с отрицательной параллельной обратной связью по напряжению



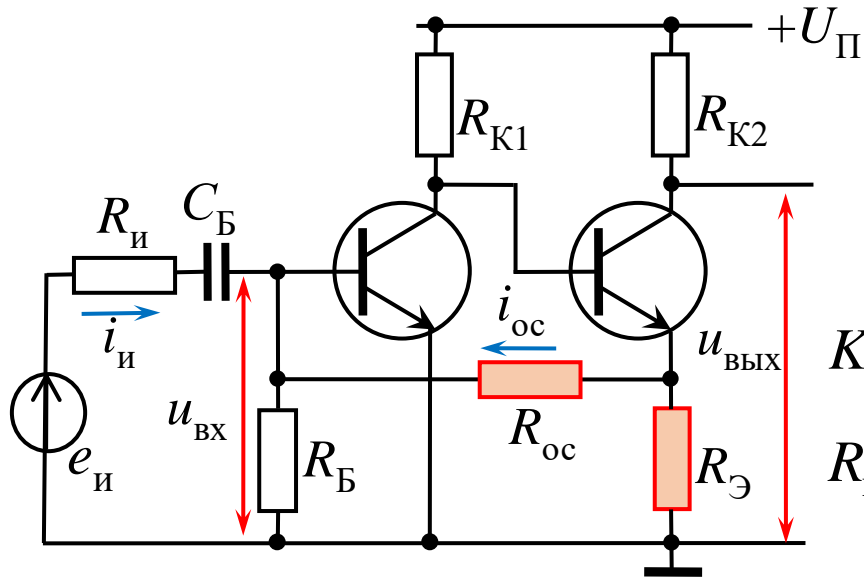
$$K_u = -SR_K$$

$$R_{BX} \approx h_{21э} \parallel \frac{R_{oc}}{1 + K_u}$$

$$K'_e = \frac{\gamma K_u}{1 + \beta K_u}$$

$$\gamma \approx \frac{h_{11э}}{h_{11э} + R_{и}} \quad \beta = \frac{h_{11э} \parallel R_{и}}{(h_{11э} \parallel R_{и}) + R_{oc}}$$

# Пример усилителя с отрицательной параллельной обратной связью по току



$$K_u = K_1 \cdot K_2 = -S(R_{K1} \parallel R_{BX2}) \cdot (-R_{K2}/R_{Э})$$

$$R_{BX2} \approx (h_{21э} + 1)(r_э + R_{Э}) \text{ при } R_Б, R_{ос} > h_{11э}^{(1)}$$

$$K'_e = \frac{\gamma K_u}{1 + \beta K_u}$$

$$R'_{BX} \approx h_{11э}^{(1)} \parallel \frac{R_{ос}}{1 + K_1}$$

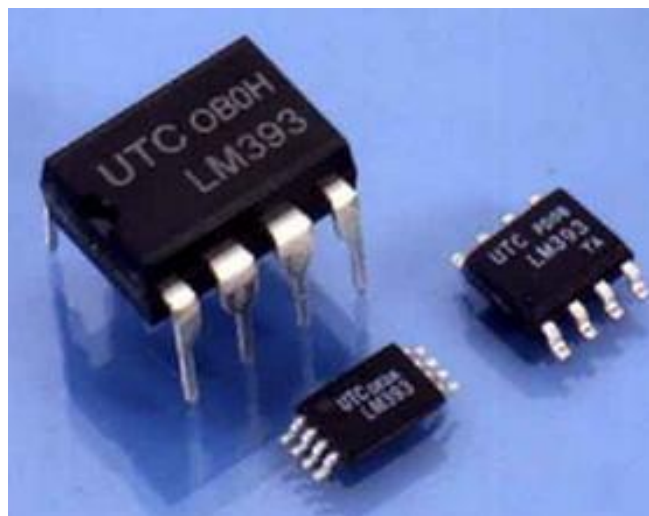
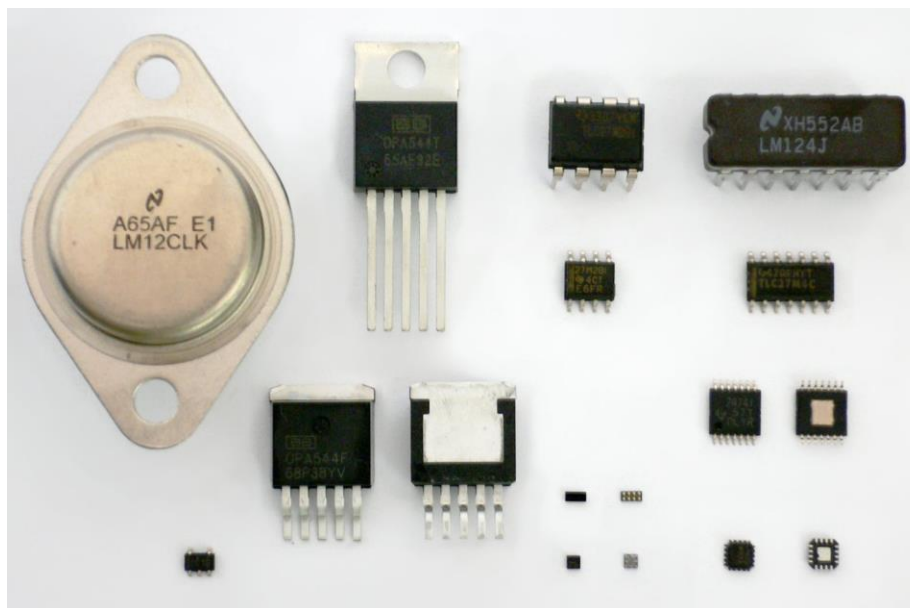
$$\gamma \approx \frac{h_{11э}^{(1)}}{h_{11э}^{(1)} + R_{и}} \quad \beta = \beta_1 \cdot \beta_2 = \frac{R_{Э}}{R_{K2}} \cdot \frac{h_{11э}^{(1)} \parallel R_{и}}{(h_{11э}^{(1)} \parallel R_{и}) + R_{ос}}$$



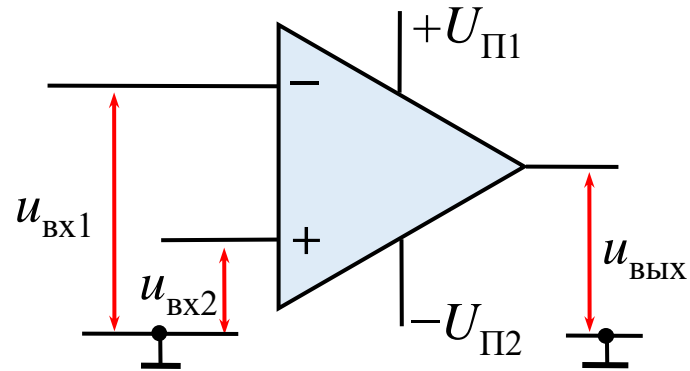
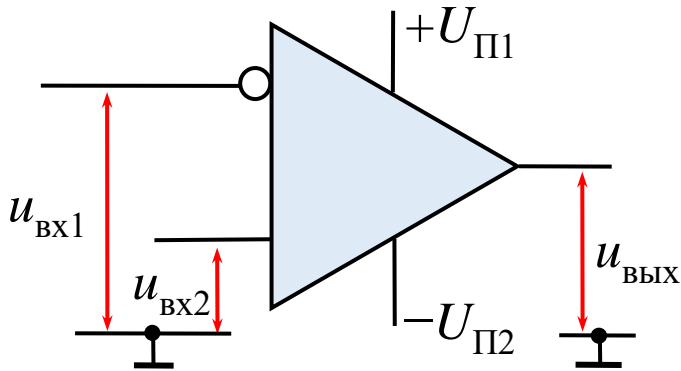
# ОПЕРАЦИОННЫЙ УСИЛИТЕЛЬ



1940-е годы



# ОПЕРАЦИОННЫЙ УСИЛИТЕЛЬ



*Основные параметры операционного усилителя*

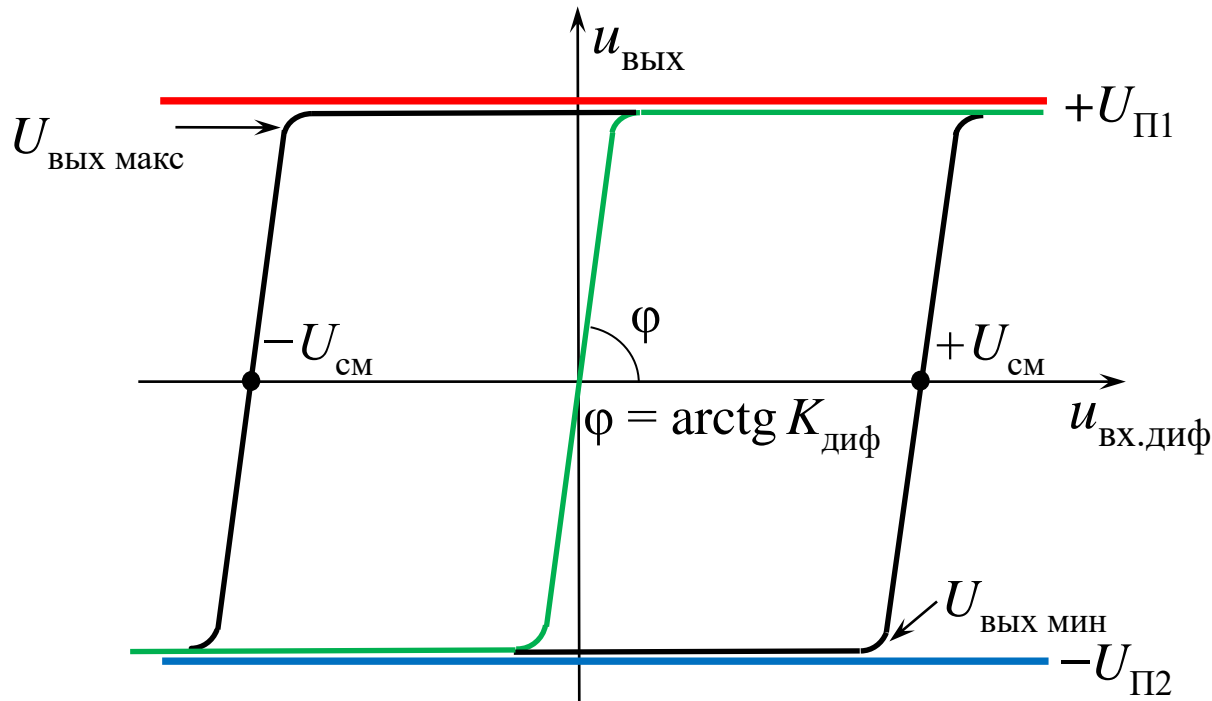
$$u_{\text{ВЫХ}} = K_{\text{диф}} (u_{\text{ВХ2}} - u_{\text{ВХ1}}) \quad K_{\text{диф}} = 10^3 \div 10^6$$

$$\text{КОСС} = 20 \lg \frac{K_{\text{диф}}}{K_{\text{сф}}} \quad \text{КОСС} = 60 \div 120 \text{ дБ}$$

$$R_{\text{ВХ}} \geq 10^6 \text{ Ом}$$

$$R_{\text{ВЫХ}} \leq 200 \text{ Ом}$$

**Напряжение смещения  $U_{\text{см}}$ :** типичные значения составляют  $10^{-3} \div 10^{-6}$  В



**Входной ток:** типичные значения входного тока составляют  $10^{-9} \div 10^{-12}$  А.

**Сопротивление нагрузки:** типичное минимальное сопротивление нагрузки составляет 2 кОм.